

マイクロ・ナノ加工技術ロードマップ

機械材料・材料加工部門 第六技術委員会 東京工業大学 秦 誠一

1. はじめに

日本機械学会 機械材料・材料加工部門 第六技術委員会では、機械材料・材料加工分野での重要な技術であるマイクロ・ナノ加工技術に関する技術ロードマップを作成した。マイクロ・ナノ加工あるいは微細加工の定義は、未だ確固としたものはないが、例えば、平成10年に財団法人マイクロマシンセンター標準化委員会が策定した微細加工の定義¹⁾によれば、微細加工とは「加工法の中で、被加工物の厚さ方向だけでなく、加工面内での横寸法にも細かく精密なものの総称」としている。また、増沢らは「500 μ m以下の寸法の加工をマイクロ加工とするのが主流である。」としている²⁾。

これらから、本ロードマップではマイクロ・ナノ加工を「被加工物の最小加工寸法（加工分解能）がマイクロメートルあるいはナノメートルオーダーである加工」とする。そこで、この加工分解能を、マイクロ・ナノ加工を代表する汎用的なパラメータとした。

2. 加工精度と加工分解能

精密加工の分野では、谷口による有名な技術ロードマップが存在している³⁾。谷口は、汎用パラメータとして総合加工精度を採用している。総合加工精度とは、図1に示すようにかたより誤差（正確度）とばらつき誤差（精密度）の和、すなわち許容公差である。自明として、本技術ロードマップの加工分解能は、このばらつき誤差の幅 σ を超えることはできない。

ここで、様々なマイクロ・ナノ加工法における加工分解能を考える。微細穴加工においては、実現可能な穴径の最小径が、その加工法の加工分解能となる。フォトリソグラフィでは、レジストパターンの現像分解能、すなわちラインアンドスペースパターンが製作できる最小線幅が加工分解能となり、光造形法では、硬化（付加）可能な最小体積が加工分解能となる。

さらに、マイクロ・ナノ加工は2次元的な加工と3次元的な加工法が存在する。前述のフォトリソグラフィでは、最小加工寸法は2次元で表記できるため、2次元の加工分解能を有するマイクロ・ナノ加工である。光造形法、微細放電加工、微細エンドミル加工などは、3次元の加工分解能を有する。

3. マイクロ・ナノ加工技術のロードマップ

以上の観点から、図2のような技術ロードマップを作成した。図2の技術ロードマップは、2次元および3次元のマイクロ・ナノ加工の加工分解能の年代変遷図である。さらに、谷口による超精密加工限界と、加工分解能の極限である原子

格子間隔を合わせて示している。加工分解能は、この加工限界と原子格子間隔を超えることは出来ない。

図2のロードマップから読み取れることは、まず、2次元的なマイクロ・ナノ加工の加工分解能は、3次元的な加工より高分解能である。これは、制御すべき加工軸の多元化に伴う困難さなどから、直観的に容易に理解できる。次に、3次元的なマイクロ・ナノ加工の加工分解能は、その加工法により約二桁のオーダーでばらつきが生じている。これは、3次元的なマイクロ・ナノ加工が、機械的加工から光造形まで多岐にわたることと、その加工法で加工できる材料によっても、加工分解能が変化するためであると考えられる。最後に、現在の傾向を単純に外挿すると、2次元マイクロ・ナノ加工の加工分解能が原子オーダーに達するのは、2025年以降、3次元マイクロ・ナノ加工では、早いものでも2035年以降と考えられる。

これらマイクロ・ナノ加工は、これまで除去加工もしくはトップダウン的な加工が主流であった。原子オーダーの加工を実現するためには、別のアプローチ、すなわちボトムアップ的な加工の実現も必要と思われる。光造形類似技術が急速に加工分解能を向上させているのも、そのボトムアップ的加工が、マイクロ・ナノ加工に適している証左と言える。さらに、実用的な速度で原子オーダーのボトムアップ的加工を実現する方法として、原子、分子の自己組織化を利用する方法などが考えられる。

4. おわりに

マイクロ・ナノ加工技術は、金型から半導体まで、高付加価値で機能性を要求される製品に密接に関係している。原子オーダーの2次元、3次元のマイクロ・ナノ加工が実用化されれば、たとえばフルカラー、高精細な電子ペーパー、薄さ数mmのモニタ、テラバイトクラスのストレージメモリ、超高燃費自動車や燃料電池の小型化など情報機器から環境対策まで、広い技術分野での革新が期待できる。それにより、社会にどのような変革が生じるのか、是非この目で確かめてみたいものである。

参考文献

- 1) <http://mmc.la.cocacn.jp/standard/term/term.html>
- 2) 増沢隆久, マイクロ化の流れ, 生産研究, 58-2 (2006), 81-82.
- 3) 谷口紀男, ナノテクノロジーの基礎と応用, (1988), 2-3, 工業調査会.

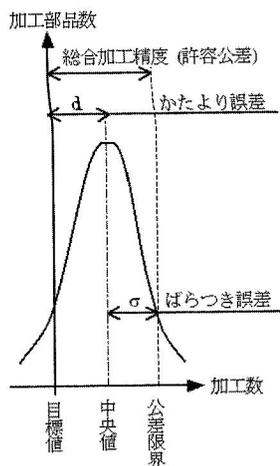


図1 総合加工精度³⁾

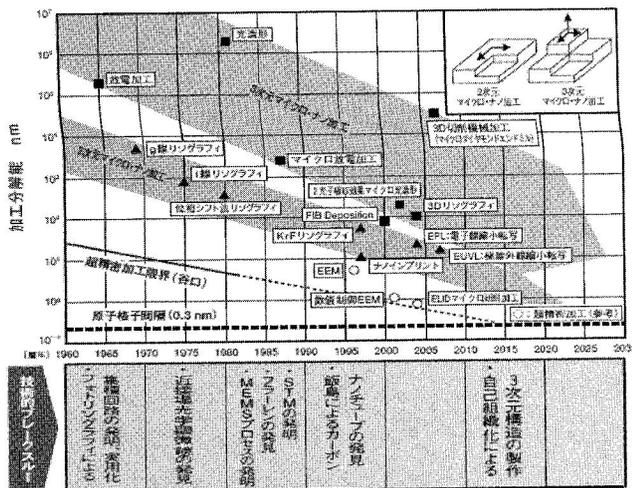


図2 マイクロ・ナノ加工技術ロードマップ

Micro- and Nano-Processing

(1) Aims

This roadmap picks up the processing resolution, which represents the minimum processing dimensions, as a general-purpose parameter related to the micro- and nano-processing technology important in the machine material and material processing fields. The processing resolution is an important parameter that shows the progress of the processing technology. This roadmap classifies micro- and nano-processing into two-dimensional micro- and nano-processing and three-dimensional micro- and nano-processing. It intends to clarify the chronic changes and forecast of progress of the processing resolution. It discusses about the possibility of the atom-order processing resolution, which is the limit of processing technology, the period of actualization, necessary breakthrough, and impacts of new processing technology upon the industry and society. Through these discussions, it will give quantitative targets and social and academic meaning to engineers and contribute to further progress in mechanical engineering.

(2) Social and technical needs

- Size reduction, weight reduction and performance improvement of products in use
- Development of finer and highly integrated manufacturing technology and peripheral technology pursuant to development of highly integrated electronic circuits
- Creation of new products and new industries by means of size reduction (□-TAS, micro-satellites, micro-factories, etc.)
- Minute processing and damage-less processing of functional materials

(3) Key parameters

This roadmap picks up the processing resolution as the key parameter of micro- and nano-processing and shows the chronic change of resolutions of two-dimensional and

three-dimensional micro- and nano-processing. It also shows the limit of ultra-precision processing enabled by Taniguchi well known in ultra-precision processing. The processing resolution cannot exceed this processing limit.

The resolution of two-dimensional micro- and nano-processing is higher than that of three-dimensional micro- and nano-processing. It is known by intuition if we take the number of processing axes to be controlled into consideration when multiplying the dimensions. If we simply consider the current tendency, the resolution of two-dimensional micro- and nano-processing will reach the atomic order in 2025 or later, and the resolution of three-dimensional micro- and nano-processing will reach the atomic order in 2035 or later in the earliest cases.

(4) Future directions for determining key mechanisms and parameters

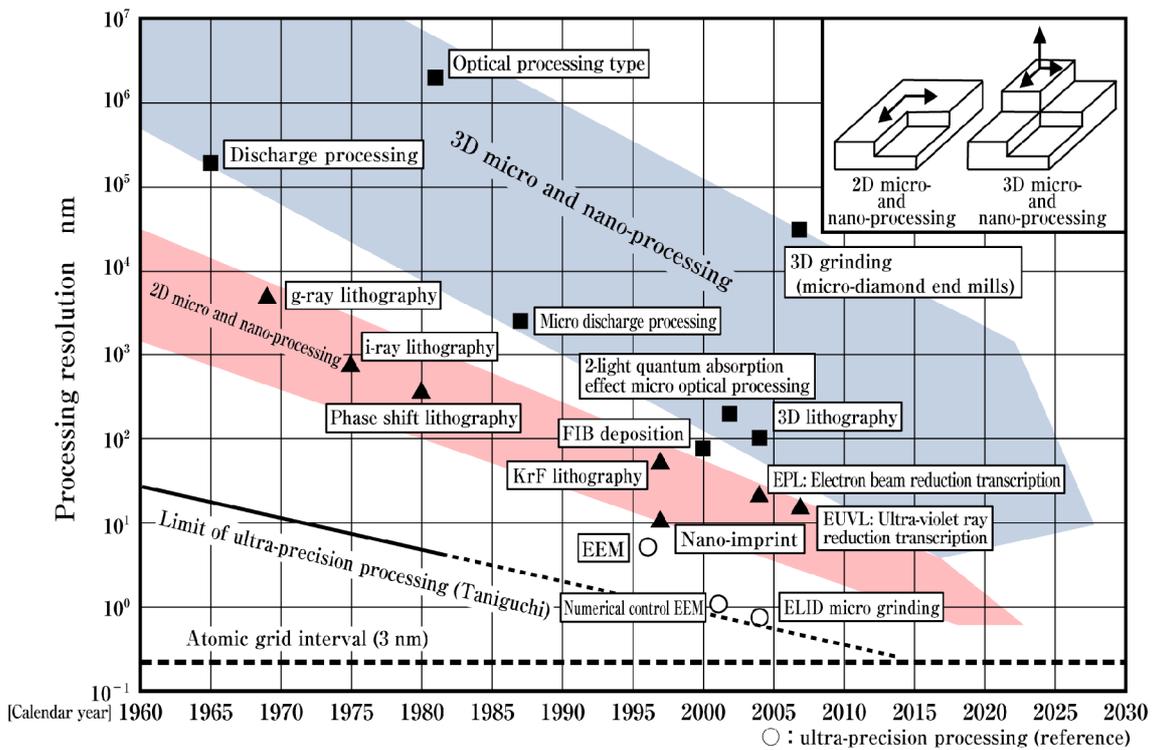
The main stream of the traditional micro- and nano-processing was removal processing or top-down processing. Another approach, i.e., bottom up processing may be needed to achieve atom-order processing. Besides, methods of using self-organization of atoms and molecules may be promising to achieve bottom up processing at practical velocity.

(5) Contribution to society

The micro- and nano-processing is closely related to products requiring high added values and functionality from metallic dies to semiconductors. If atom-order two-dimensional and three-dimensional micro- and nano-processing is put into practical use, it will enable innovation in a wide range of technologies from information equipment to environmental activities, including full color and fine electronic paper, monitors of several millimeters in thickness, terra-byte class storage memory units, very high-efficiency cars, and small fuel batteries.

Social & Technical Needs

1960~1970	<ul style="list-style-type: none"> • Semiconductor pressure sensors • Presentation of top-down nano-technological concept by Feynman • Proposal of ultra-precision processing
1970~1980	<ul style="list-style-type: none"> • Proposal of nano-technology by Taniguchi • Researches of micro-mechanisms by Hayashi and others • Researches of artificial lattice structures by Esaki
1980~1990	<ul style="list-style-type: none"> • Thermal type ink jet printers • Proposal of bottom up molecular machines by Dreksler
1990~2000	<ul style="list-style-type: none"> • Mobile telephones • Piezo type ink jet printers • Mass production of DMD devices
2000~2010	<ul style="list-style-type: none"> • Development of intelligent cars
2010~2020	<ul style="list-style-type: none"> • Friction loss reduction and demands for further energy saving
2020~2030	



Technical Breakthrough

1960~1970	• Invention and practical use of ICs by means of photo-lithography
1970~1980	• Discovery of proximity field optical microscope
1980~1990	• Invention of MEMS processes • Discovery of Fullerene • Invention of STM
1990~2000	• Discovery of carbon nano-tubes by Iijima
2000~2010	
2010~2020	• Making 3D structures using self organization
2020~2030	

Changes in Society and Markets

1960~1970	• Large computer NEAC was released first in Japan. • Color TV broadcasting started. • FM radio broadcasting was started by NHK.
1970~1980	• LCD LSI calculators were released by Sharp. • Personal computers PC-8001 were released by NEC. • Automobile telephone services started. Word processors were released.
1980~1990	• MEMS researches boomed. STM appeared. • LDs were released by Pioneer. • Manufacturing of 64 KB DRAMs and satellite broadcasting started. • Micro-machine engineer society was established. • Personal computer communication started. Internet connection started.
1990~2000	• National micro-machine project
2000~2010	• National nano-technology strategy in the United States. • Nano-technology market scale will reach 20 to 30 trillion yen in 2010.
2010~2020	• Very fine semiconductor processing technology featuring 1 nanometer resolution for manufacturing 0.01 micron rule LSIs will be developed. • Technology for mass production of LSI patterns with maximum dimension of 10 nm will be put into practice.
2020~2030	• Nanometer scale 3D IC processing technology